时空特征分析结合随机密钥的压缩域数字视频水印嵌入和提取方法 *

邱一城[1]，薛　峰[1]，唐晶磊[2]

(1. 中原工学院信息商务学院，郑州 451191; 2. 西北农林科技大学信息工程学院，陕西 杨凌 712100)

摘　要：针对现有水印嵌入和提取算法对滤波、压缩和噪声条件较为敏感的问题，提出了一种鲁棒的基于时空特征的压缩域数字视频水印嵌入和提取方法。提出的框架由一个公共密钥和一个私有密钥组成，用于阻止自我共谋攻击。算法对视频进行时空分析，并从压缩视频的时空特征中提取公共密钥，在本质上具有鲁棒性。首先，利用一个随机密钥从事先选取的块集合中选取候选块，进而确保水印框架的安全。然后基于压缩视频的时空特征选取出适合嵌入水印的4×4子块。最后，利用非零量化系数嵌入水印位。该水印框架允许视频位速率有限的增加，并且降低了计算的开销。实验结果显示，相比其他几种对比方法，提出的方法具有较强的鲁棒性和安全性。

关键词：数字水印；时空特征；鲁棒性；压缩视频；随机密钥；非零量化系数

中图分类号：TP391　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.0256

Compression domain digital video watermark embedding and extraction based on Space-time features and random key

Qiu Yicheng[1], Xue Feng[1], Tang Jinglei[2]

(1. *College of Information & Bussiness*, *Zhongyuan Institute of Technology*, *Zhenzhou Henan* 451191, *China*; 2. *School of Information Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that the existing watermark embedding and extraction algorithms are sensitive to the filtering, compression and noise conditions, a robust digital-domain video watermark embedding and extraction method based on space-time features is proposed. The proposed framework consists of a public key and a private key to prevent self-conspiracy attacks. The algorithm performs spatiotemporal analysis on the video and extracts the public key from the spatio-temporal feature of the compressed video, which is inherently robust. First, a random key is used to select a candidate block from a pre-selected block set to ensure the security of the watermark frame. Then the 4×4 sub-block suitable for embedding watermark is selected based on the spatio-temporal features of compressed video. Finally, the watermark bits are embedded using non-zero quantized coefficients. The watermarking framework allows a limited increase in the video bit rate and reduces the computational overhead. The experimental results show that compared with the contrast method, the proposed method has strong robustness and safety.

Key words: digital watermark; space-time features; robustness; compressed video; random key; non-zero quantized coefficients

0　引言

数字水印作为一种多媒体对象版权保护手段，其高效性和安全性一直受到广泛关注。数字视频存储和传输过程中采用压缩格式，这使得许多研究者开始研究如何在压缩域对视频进行加水印操作[1-4]。如果能够在压缩域对其进行嵌入和提取，就能避免对压缩视频进行完整的解码和重新编码。当前存在许多视频压缩标准，而高效视频编码(HEVC)作为当前最流行的一种视频压缩标准，是H.264视频编码的改进版本，其可以高效的进行视频压缩。HEVC主要关注点是如何提高视频分辨率，其采用了并行处理架构。HEVC可以进行高效压缩并且支持定制化和高端4K内容，能够进行多视角编码播放。目前，HEVC编码视频中的水印技术仍然处在研究的初级阶段[5,6]。

文献[7]中提出了一种盲提取算法，该算法在压缩视频的 I 帧中嵌入水印。根据预测模型结果值和一个4×4块的非零量化系数(NNZ)的个数选取出适当的块，将非零系数变为零可以隐藏水印位。文献[8]中设计了一种数据隐藏框架，这种框架利用数据隐藏禁区的概念选取嵌入区域。文献[9]中为了在 I 帧视频

收稿日期：2018-05-03；**修回日期：**2018-06-27　**基金项目：**国家自然科学基金面上项目（61472314）

作者简介：邱一城（1989-），女，河南安阳人，硕士，讲师，主要研究方向为数字水印算法；薛峰（1983-），男，河南郑州人，硕士，讲师，主要研究方向为数字水印算法、计算机应用；唐晶磊（1974-），女，河北邢台人，博士，副教授，硕导，主要研究方向为数字水印、计算机视觉等.

图像中嵌入水印需要改变系数符号的奇偶性以及中频系数的大小。在文献[10]中将水印嵌入到压缩域内 P 帧视频的非零系数中，这样做的目的是为了使加过水印的视频在视觉上具有较好的质量，而且还可以限制视频比特率的增加。在文献[11]中提出了一种非盲 H.264/CAVLC 结构保存替换水印算法，这种算法在于非参考帧不同的运动向量中通过位替换完成水印的嵌入。文献[12]中提出了一种非盲水印算法，这种算法在 I 帧和 P 帧中嵌入水印。文献[13]利用扩展频谱和 Watson 视觉模型选取的系数完成水印的嵌入。然而这些方法在面对滤波、压缩和噪声条件时不能保持较高的质量和鲁棒性。

基于此，本文提出了一种新颖的面向 HEVC 视频编码的视频水印方法，该方法根据压缩视频的时空特征选取用于水印嵌入的块，最小化同步误差。水印嵌入和提取算法本质上也具有鲁棒性。本文提出的框架由一个公共密钥和一个私有密钥组成用于阻止自我共谋攻击。从压缩视频的时空特征中可以提取公共密钥。利用一个随机密钥从事先选取的块集合中选取候选块进而确保水印框架的安全，块集合的提取是基于压缩视频的时空特征完成的。本文仅利用非零量化系数嵌入水印位，因此水印框架允许视频位速率有限的增加。新方法采用了压缩域特征提取出公共密钥，选取用于嵌入的块和嵌入水印，这种方法降低了计算的开销。在参考软件 JM17.2 运行的结果也验证了提出方法的有效性。

1 时空特征分析与密钥提取

本文提出了一种面向 HEVC 编码视频的鲁棒性水印框架。在该框架中，首先在 I 帧中选取候选块用于在 HEVC 编码视频中嵌入水印，将选取的候选块称为嵌入区域。提出的方法为了提高水印对可接受的内容保持类的鲁棒性，并确保水印对内容恶意篡改的敏感性，本文将对 H.264 码流的语义元素进行基于时空特征的分析，从而选取出符合要求的区域进行水印嵌入。然后，本文提出了一种水印嵌入和提取算法。此外，提出的方法还对公共密钥的提取以及嵌入阈值的评估过程进行了说明。

1.1 时空特征分析

由于人眼部结构的特殊构造，人眼对运动平坦区域的噪声往往比对运动复杂区域和视频边缘区域更敏感。基于此，纹理比较复杂的的区域往往更适合进行水印嵌入。一种水印框架的效率依赖于嵌入区域的选取。为了选取适当的嵌入区域，提出的方法首先选择适当的 I 帧视频图像用于水印嵌入，由于 I 帧中含有比 P 和 B 帧中更广泛的信息，因此本文在 I 帧上进行处理。如果任何攻击者试图操控 I 帧，那么视频的视觉质量将会大幅下滑[14]。在 HEVC 编码视频的 I 帧中，如果具有尺寸为 32×32、32×16、16×32 或者 16×16 的预测模式，那么将一个块称为平滑模式块。具有这些预测模式的块不能用于水印嵌入。这些块用于一帧的平衡区域，在平滑区域中嵌入水印将会引起视觉可见效果。

此外，由于嵌入畸变，平滑区域中的块倾向于变成不同的模式块。在解码器进行水印提取过程中同步失效将会增加，因此，本文提出的框架不采用平滑模式块进行水印的嵌入。

利用 H.264 编码视频中非零量化残差数量(NNZ)以及非零量化 AC 系数的个数对特定块的空间运动特性进行统计，统计结果显示包含非零系数越多的 4×4 子块，其空间运动特征也就越强烈。为了对这一结果进行验证，我们选择几个没有水印的视频序列进行重编码，进而得出不同 NNZ 的 16×16 子块和 4×4 子块中帧内预测模式的变化率。图 1 是几个不同序列分别进行 QP=18 和 QP=28 重编码后选取的非零量化残差变化。图 1 表明，含有较少数量的 NNZ 的 4×4 的预测模型更易发生变化。

以上的空间特性分析表明，不同视频序列的 NNZ 不同，且较少数量的 NNZ 的 4×4 的预测模型更易发生变化。因此在选取适合的 4×4 子块时需要设定一个自适应阈值 ω。为了确定 ω 的值，采用分布函数 F_{NNZ}，计算如下:

$$F_{NNZ}(\omega) \le T \tag{1}$$

F_{NNZ} 定义如下：

$$F_{NNZ}(\omega) = P(NNZ \le \omega) = \sum_{NNZ \le \omega} p(NNZ) \tag{2}$$

利用函数 F_{NNZ} 确定 ω 的值，在 $NNZ > \omega$ 的 4×4 子块嵌入水印，能够并且在不影响视觉质量的前提下保证水印对内容恶意篡改的敏感性。

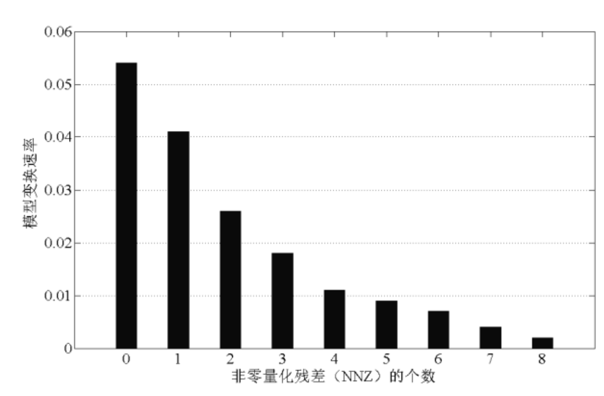


图 1 NNZ 的变化示意图

1.2 嵌入区域

在连续帧中嵌入不相关的水印通常会导致的时间闪烁和视觉可见效果，运动信息在避免这种时间闪烁上十分必要。由于在一个运动强度较低区域中任何扰动都轻于运动强度较高区域或者统计区域(非运动)中的扰动级别，因此加过水印的视频质量会发生退化。I 帧中运动向量的大小为零，这是因为这些帧是内部编码。在先前图像组(GOP)中距离 I 帧最近的 P 帧中选取运动向量来表示 I 帧的运动向量，此时选取的 I 帧的运动向量为伪运动向量，具体步骤如下所示：

1、将 P 帧划分成不重叠的块。

2、计算先前 GOP 中 P 帧内所有块的运动向量。

3、利用一个 3×3 大小的中值滤波器对所有的运动向量进行平滑处理。

4、P 帧中内部编码块的运动向量含有零值，因此，在各自的最大编码单元(LCU)中对相邻块的内部编码块的运动向量进行评估。

5、通过在最近邻 P 帧中的相同位置上插入运动向量，为 I 帧中的每一块分配伪运动向量。

最后，获取 I 帧中每个块的伪运动向量。如果一个块的伪运动向量值大于零，那么可以选取这个块嵌入水印。图 2 中给出了预测模式中速率的变化与伪运动向量之间的关系，图中表明在一个运动强度较低的区域嵌入水印可以获得一个面向同步误差的鲁棒性。

选取一个适当的阈值用于水印的嵌入，用 M_t 表示，其中 $M_t > 0$。所有选取用于水印嵌入的块中非零伪运动向量的值小于阈值 M_t。阈值 M_t 的大小依赖于预测模式变化的速率和伪运动向量之间的关系。本文根据图 2 图中的结果将 M_t 的值设置为 20。虽然图中误差条是不可见的，但是获取了 80%的置信水平结果，图 2 是基于 CIF 和 QCIF 视频的特性。

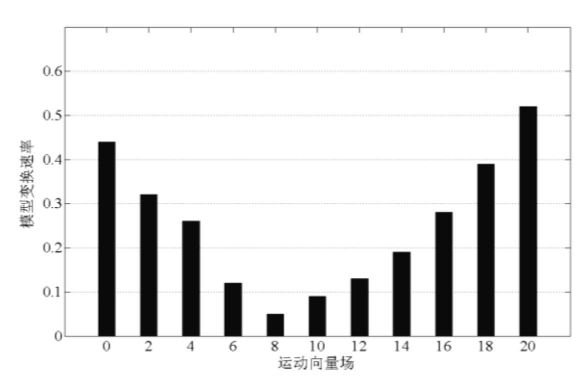


图 2 预测模型关于运动向量的变化示意图

提出的嵌入区域选取程序加入了一个视觉阈值用于维持加上水印后的视频具有一个可接受的视觉质量，用 V_t 表示这个视觉阈值。将从 DCT 转换中获取的系数在一个 4×4 的块中划分为 DC 系数和 AC 系数，由于 AC 系数相比于 DC 系数来说对嵌入误差的敏感性更低，因此本文采用了 AC 系数。用 AC_1 和 AC_2 表示 DCT 转换块中的最先的两个非零 AC 系数，如果一个块的 AC_1 和 AC_2 之间的绝对差大于阈值 V_t，那么这个块可以用于嵌入水印。程序 1 中选取了适合水印嵌入的 4×4 内部预测块。

程序 1：块选取

输入：未加水印的视频

输出：为嵌入的水印选取适当的块

for 未加水印视频的每个 I 帧 do

for I 帧中的每一个块 do

if 零度预测模式 ≠ 平滑 then

计算一个块中的 NNZ；

if $NNZ > N_t$ then

计算先前 GOP 中 P 帧的运动向量；

利用一个 3×3 中值滤波器对运动向量进行平滑处理；

if P 帧中的内部预测块 then

伪运动向量＝先前 GOP 中 P 帧相同位置块的运动向量；

else

$$平均运动矢量=\frac{\sum_{i=0}^{63}运动矢量(i)}{64};$$

伪运动向量＝先前 GOP 中 P 帧相同位置处块的平均运动向量；

if $0 <$ 伪运动矢量 $< M_t$ then

if 至少提出了来年改革非零 AC 系数 then

选取 $AC_1 > 0$ 和 $AC_2 > 0$；

计算 $D = MagRound(AC_1, AC_2)$；

if $D < V_t$ then

这个块可以用于水印嵌入；

1.3 密钥提取

在每个 I 帧中，利用程序 1 选取的块中的一个随机密钥选取用于嵌入的候选块。候选块中实际上已经嵌入了水印，利用一个伪随机密钥选取候选块可以增强本文提出框架的安全性。视频中的不同帧将具有不同的密钥，利用一个伪随机数生成器随机生成一个密钥，这样可以避免发生自我串通攻击[16]。利用程序 2 在程序 1 选取的块集合中随机选取候选块可以确保算法的安全性。

程序 2：选取候选块

输入：未加水印的视频

输出：用于水印嵌入的候选块

for 未加水印视频中的每个 I 帧 do

for 利用程序 1 选取的每个块 do

利用一个伪随机数生成器生成一个密钥；

利用随机密钥 K 选取候选块；

解码器中缺乏调色码的情况下，将利用程序 1 选取候选块记忆随机密钥 K；

如果水印嵌入在相关 I 帧中的相同位置上，那么嵌入算法容易受到自我串通攻击[16]。因此，需要一个非常长的视频序列。但是传输一个较长的序列对于算法来说并不实际。通过一个公共密钥的组合生成序列可以解决这个问题，公共密钥是从 LCU 的一些特征提取而来，即版权拥有者对一个尺寸为 64×64 的块和一个私有密钥进行处理。从每个 LCU 中提取公共密钥，并将公共密钥转给具有私有密钥的加密系统。

HEVC 解码器信息中的压缩域特征可以用于生成公共密钥，而不需要进一步进行解码。从 LCU 中的一些特征中可以提取出公共密钥，攻击者在不降低视频视觉质量的情况下不能改变公共密钥。为了使获取的公共密钥具有更强的鲁棒性，本文采用了 LCU 的一些特征，这些特征对于人眼十分敏感。其中的一个特征为 LCU 的 DC 系数，如果利用自身的 DC 系数提取公

共密钥，那么攻击者可以利用相同的量改变 DC 系数，这将使得水印无法检测到。在 I 帧中，将非零 DC 系数的值变为零，或者将大小为零的 DC 系数变为一个非零值，这样都可能降低加水印视频的视觉质量，或者甚至产生块效应。另外一个特征是 LCU 的色度预测模式。

根据 DC 组件和 LCU 中的色度预测(彩度)模式从每个 LCU 中提取一个 256 位长的公共密钥。最前面的 64 位给出了 LCU 中每个 4×4 块的 DC 系数，后续的 192 位给出了每个 LCU 中 4×4 块的彩度模式，每个彩度模式用 3 个位表示。

根据候选块的位置和公共密钥评估出私有密钥。水印系统的安全性通常情况下不如加密系统复杂。利用行程长度编码对加密后的密钥进行无损压缩。对于所有用户来说公共密钥都是可用的，但是通过安全通道将私有密钥发送给授权用户。

2　水印嵌入与提取

2.1　水印嵌入

利用压缩域特征可以将一个双水印序列 $(-1,1)$ 不可视地嵌入到 HEVC 编码视频中 I 帧的候选块内。在本文提出的水印框架中，本文通过改变两个非零 AC 系数的值将水印位嵌入到候选块中，此处所说的两个非零 AC 系数为 AC_1 和 AC_2。

为了增强水印框架的鲁棒性，采用了一个鲁棒性阈值，用 R_t 表示，其中 $R_t>0$。嵌入程序的具体过程如下：

如果水印位的值为 -1 并且 AC_1 的值小于或者等于 AC_2 的值，将修正系数表示为 $AC_1^{'}=AC_1+D+sign(D)\times R_t$ 和 $AC_2^{'}=AC_2-D-sign(D)\times R_t$，其中 D 表示函数 $MagRound(AC_1,AC_2)$ 的结果值。

类似的，若水印位的值为 $+1$，并且 AC_1 的值大于 AC_2 的值，就可以将修正系数表示为 $AC_1^{'}=AC_1-D-sign(D)\times R_t$ 和 $AC_2^{'}=AC_2+D+sign(D)\times R_t$。如果水印位的值为 -1 并且 AC_1 的值大于 AC_2 的值，或者水印位的值为 $+1$ 并且 AC_1 的值小于或等于 AC_2 的值，那么将不进行任何改变。如果 R_t 的值很大，那么 AC_1 和 AC_2 之间的绝对差就会很大，这将增强算法的鲁棒性，但是会使得水印视频的视觉质量出现大幅度下滑。程序 3 中给出了水印嵌入的一般过程。

程序 3：水印嵌入

```
输入：未加水印视频
输出：水印视频
for 未加水印视频中的每个 I 帧 do
  for 每个满足程序 3 的候选块 do
    选取 AC_1 和 AC_2；
    计算 D = MagRound(AC_1, AC_2)；
    if((水印位 < 0 and |AC_1| − |AC_2| ≤ 0) or (水印位 > 0 and |AC_1| − |AC_2| > 0))   then
      AC_1' = AC_1 − (水印位)(D + sign(D) × R_t)；
      AC_2' = AC_2 + (水印位)(D + sign(D) × R_t)；
    else
      不改变任何系数；
  根据候选块的位置生成调色码；
```

如果水印没有嵌入到适当的系数，那么这个水印算法的鲁棒性较差，并且可能会对水印视频产生视觉影响。因此，选取适当的系数或特征进行水印的嵌入变得十分重要和关键。在一个候选块中含有一个或者多个压缩域特征，比如 NNZ、量化系数的符号和大小以及运动向量的符号和大小，这些压缩域特征可用于水印嵌入。本文利用下面给出的准则选取适当的特征：

1、低频非零量化 AC 系数的大小：低频系数对于同步误差具有较大的稳定性[15]。将这些系数嵌入到一个块的水印位之前可以对系数进行改变，这样可以保持质量退化，并增加视频比特速度和同步误差。

2、NNZ 值：在文献[3]中，将非零系数变为零进而嵌入到水印位中，这样降低了非零量化 AC 系数(NNZ)增加了同步误差。根据水印块预测的块在解码器中与水印块的邻域具有较好的匹配结果。此外，将非零系数变为零可以明显降低视频质量。类似的，将零系数变为非零则可以增加解码器处的同步失效次数。此外，将零系数变为非零将使得水平比特速率显著增加。因此，一个块的 NNZ 值不会变为嵌入水印。

3、DC 系数：DC 系数不能用于嵌入水印，这是因为水印视频的质量将会显著降低，甚至会引起块效应[16]。

4、AC 系数的符号：在文献[9]中，将 AC 系数的符号改变后嵌入到水印位中，这将大幅度降低水印视频的质量。因此，不能改变用于水印嵌入的系数的符号。

5、高频系数：由于同步误差和滤波器的使用将高频 AC 系数重置为零。

总的来说，只有 I 帧中的 4×4 块内的低频非零量化 AC 系数适合嵌入水印。为了降低复杂度，两个非零量和 AC 系数，即 AC_1 和 AC_2，这两个 AC 系数在 4×4 块中按照锯齿状序列排列，对这个块进行改变用于嵌入水印位。在这样的系数中嵌入水印将造成明显的视觉影响。由于水印噪声的影响，在同步失效的情况下这些系数的值不能改变。

2.2　水印提取

熵解码后在解码器处进行水印的提取。公共密钥被干扰的情况下利用私有密钥生成合成序列(调色码)，合成序列指明了候选块中用于嵌入的位置。调色码是一个二值文件序列，序列中含有候选块的位置构造[3]，在解码器中利用这个序列进行水印的提取。

在本文提出的框架中，解码器段通过组合私有密钥和公共密钥生成一个调色码。在大多数文献中[3,5]，通过一个安全通道将调色码发送给解码器。在本文提出的框架中，仅将压缩的私有密钥发送给授权用户用于提取水印位。当解码器中没有调色码时，利用程序 1 选取候选块，再生成随机密钥。但是，在不知道调色码的情况下，将会降低水印框架的鲁棒性。由于存在

同步误差，因此解码器端选取块的位置与编码器端选取的位置不一定相同。

在一个 I 帧中，用 $AC_1^{'}$ 和 $AC_2^{'}$ 表示水印视频中候选块的最前面两个非零系数。如果 $AC_1^{'}$ 的值大于 $AC_2^{'}$ 的值，那么提取的水印位将为 -1，否则提取的水印位为 $+1$。程序 4 中给出了水印提取的一般过程。

程序 4： 水印提取和验证

对私有密钥和公共密钥进行解压缩；
对私有密钥和公共密钥进行加密；
通过私有密钥和公共密钥的组合生成调色码；
选取用于提取的候选块；
对每个候选块
  选取 $AC_1^{'}$ 和 $AC_2^{'}$ 用于提取水印位；
  如果 $|AC_1^{'}|>|AC_2^{'}|$ 则
    水印位为 -1；
  否则
    水印位为 $+1$；

3 实验结果

利用 H.265/HEVC 参考软件 HM9.0 运行本文提出的水印框架。PC 机相关参数如下：Intel Core i3 @ 3.30 Ghz、4GB RAM，在 Windows 10 操作系统和 64 位处理器上运行。HM9.0 中的高级工具已经在 JCT-VC 中进行了透彻的研究。在没有任何优化的条件下，JCT-VC 利用一般条件集合进行仿真实验。实验中使用了所有的主要内部配置，其中 RDQ 和 RDQTS 是残缺的。一般条件主要用于反映典型的比特流，利用这个配置对本文提出的编码效率进行评估。本文选取的配置为主要随机存取和闭合 GOP，将内部刷新类型设定为 2。

平均具有 100 帧的普通数据交换格式(CIF)和四分之一 CIF(QCIF)[18] 的视频序列的负载范围为 $=\{100,150,200,250,300\}$，利用含有一个 GOP 的二元高时延分层预测结构对视频序列进行编码，由于具有 8 和 4 个活跃参考图像，因此 GOP 中含有帧内周期，其中有效负载表示实际嵌入到视频序列中水印位的总量。在本文的实验中输入的视频具有不同的属性，比如高纹理或者低纹理，低运动或者高运动，镜头发生没发生改变，以及均匀背景或者噪声背景。将量化参数(QP)设置为 28。

本文提出的水印框架利用 H.264/AVC 参考软件 JM17.2 进行运行，并将运行结果与其它当前方法[3,4,5]进行对比，这些方法都是根据 H.264/AVC 并且都采用了一个适当的相类似 HEVC 配置，利用 H.264 对视频序列进行编码。本文在利用 HEVC 和 H.264 对每个视频系列进行编码的过程中保持有效负载不变。

3.1 嵌入容量

适合嵌入水印的块的个数表示视频的嵌入容量，本文根据视频的时空特征选取适合嵌入水印的块。对于大对数帧来说其 NNZ 的值相对小于 H.264/AVC 中对应的 NNZ 值。因此，大多数的 H.264/AVC 编码视频序列的嵌入容量都大于 HEVC 编码视频的嵌入容量。嵌入容量与运动阈值 M_t 的大小成反比，嵌入容量与视觉阈值的大小成正比。因此，嵌入容量是关于 λ 的函数，用 $F(\lambda)$ 表示。嵌入容量用 C_E 表示，其表达式如下式所示：

$$C_E = F(\lambda) \tag{3}$$

其中 $\lambda \propto \dfrac{1}{N_t \times M_t}$，$\lambda > \varepsilon_D(\tau \propto V)$，式(1)中给出了 ε_D 的表达式。一个视频的嵌入容量依赖于视频中每个 4×4 块的时空特征。因此，如果一个视频的大多数块具有较高的纹理并处于运动中，那么这个视频将具有较高的嵌入容量。

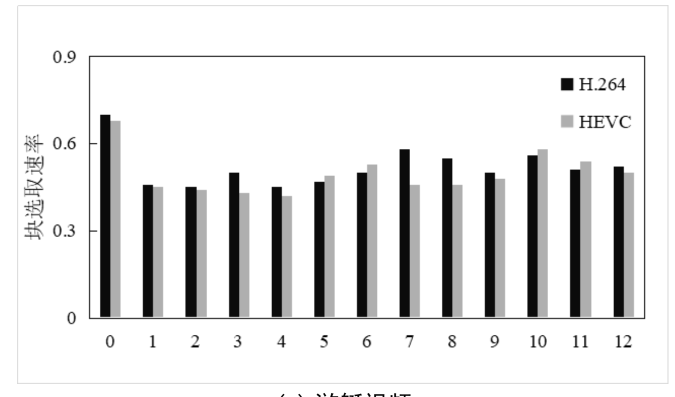
3.2 性能评估

在这一小节中本文在有效负载 $\in\{100,150,200,250,300\}$ 范围内利用峰值信噪比((Peak Signalto Noise Ratio，PSNR)和视觉质量度量(Video Quality Metrics，VQM)对水印视频的视觉质量进行了测量。本文还利用比特增加速率(Bit Increase Rate，BIR)度量对视频比特速率的增加进行了测量。将 BIR 定义为每个嵌入位的比特位增加概率[19]，即：

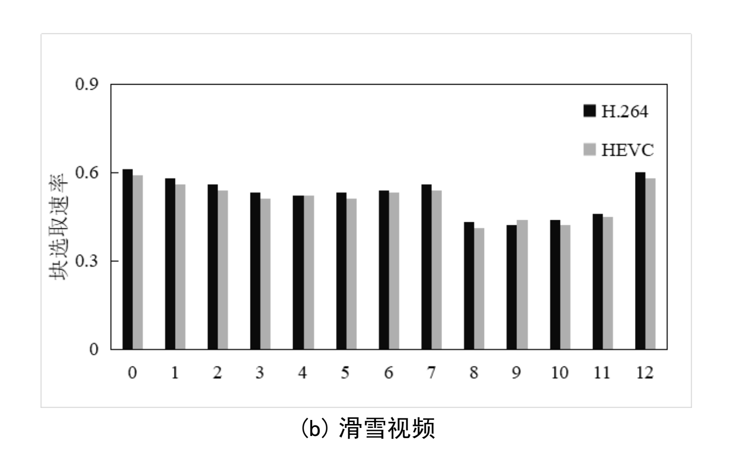
$$BIR=\left(\frac{\text{水印视频中比特位的个数}}{\text{有效负载}\times\text{初始视频中的比特位个数}}-\frac{\text{原始视频中比特位的个数}}{\text{有效负载}\times\text{初始视频中的比特位个数}}\right)\times 100 \tag{4}$$

其中有效负载表示实际嵌入到视频序列中水印位的总量。视频质量表示一个通过视频传输/处理系统进行传输后的视频的特性，其是感知视频退化的正式或者非正式量度(典型的对原始视频进行压缩)。

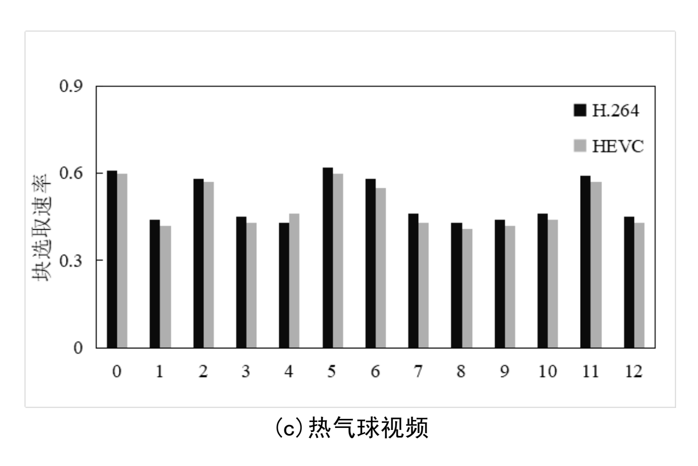
利用 PSNR 和 VQM 将本文的水印视频视觉质量与其它方法的视觉质量进行对比，并且还计算出了视频比特位速率用于与其它算法进行对比。图 3 给出了程序 1 对(a)游艇视频，(b)滑雪视频，(c)热气球视频的块选取速率。图 4 子图(a)和子图(b)中给出了本文提出框架和其他方法[3,4,5]的平均 PSNR 和 VQM 平均结果值，这些结果是五个有效负载的平均结果值，有效负载为 $\{100,150,200,250,300\}$。HEVC 编码视频的结果说明人眼不能观察到水印视频发生的质量退化。结果还显示本文提出的框架大多数情况下在 H.264/AVC 编码视频上的视觉质量结果要优于其他算法。



(a) 游艇视频

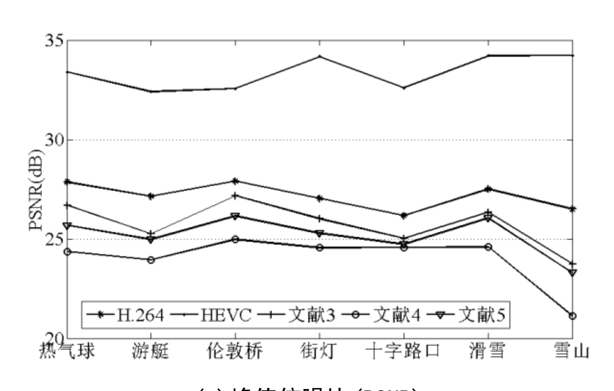


(b) 滑雪视频

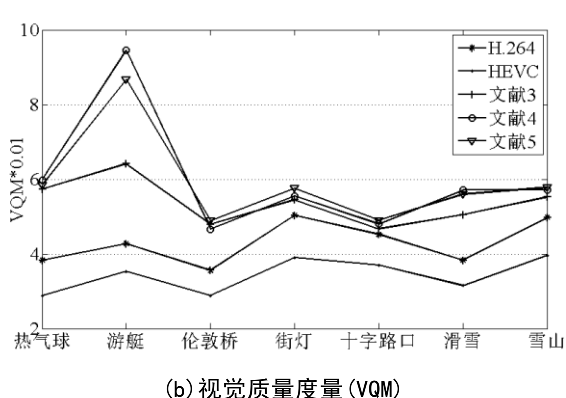


(c) 热气球视频

图 3　程序 1 对(a)游艇视频，(b)滑雪视频，(c)热气球视频的块选取速率



(a) 峰值信噪比(PSNR)



(b) 视觉质量度量(VQM)

(c) 位增加速率(BIR)

图 4　本文方法与对比方法的 PSNR、VQM 和 BIR 值

本文提出的水印嵌入框架和嵌入区域选取算法是设计用于最小化水印视频中的质量退化现象。在 BIR 情况下，图 4 子图(c)中显示视频比特速率的增加十分微小，利用本文提出的框架与其它算法[3,3,5]进行了比较，如果将零系数变为非零或者将运动向量变为嵌入水印，那么视频位速率的增加将十分明显。在本文提出的水印框架中，仅采用一个块中的两个非零系数嵌入水印位，NNZ、运动向量和块非零系数的值都没有改变。在 HEVC 编码视频中，弱化了视频比特位速率的增幅，这是因为 HEVC 与 H.264 在相同的质量情况下，前者降低了几乎 30-40%的视频比特位速率。

4　结束语

本文提出了一种新颖的压缩域数字视频的水印框架，这种新框架将一个可读水印不可视嵌入到 HEVC 编码视频的 *I* 帧中。本文执行了一系列实验以证明本文算法在视觉质量和视频比特速率增量上的有效性。本文算法在选取块的过程中采用了压缩域特征，选取的块用于嵌入水印、执行嵌入和提取算法，公共密钥的提取可以降低计算的复杂度。在以后的研究中，可以对本文提出的方法进行扩展，争取获取一个在一般压缩域水印平台可以利用不同的编码对视频进行编码，即编码独立于平台，这可以抵御更多种类的攻击。

参考文献：

[1] 解青坤, 姜艳茹, 张文飞, 等. 基于数字水印和迭代算法的信息加密技术 [J]. 光学学报, 2016, 33 (6): 76-83. (Xie Qingkun, Jiang Yanru, Zhang Wenfei, *et al*. Information Encryption Technology Based on Digital Watermarking and Iterative Algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 33 (6): 76-83.)

[2] 刘玄玄, 王晓红. 基于视觉显著图的数字水印算法 [J]. 光学技术, 2016, 42 (3): 260-263. (Liu Xuanxuan, Wang Xiaohong. Digital watermarking algorithm based on saliency map [J]. Optical Technique, 2016, 42 (3): 260-263.)

[3] 陈梦莹, 王展青. 基于 FRFT 及 HVS 的自适应数字水印算法 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (7): 2180-2183. (Chen Mengying, Wang Zhanqing. Adaptive Digital Watermarking Algorithm Based on FRFT and HVS [J].

Application Research of Computers, 2017, 34 (7): 2180-2183)

[4] 刘凡，杨洪勇，苏庆堂. 基于矩阵 Schur 分解的彩色图像盲水印算法 [J]. 计算机应用研究，2017, 34 (10): 3085-3089. (Liu Fan, Yang Hongyong, Su Qingtang. Color image blind watermarking algorithm based on Schur decomposition [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (10): 3085-3089.)

[5] Pastuszak G, Trochimiuk M. Architecture design of the high-throughput compensator and interpolator for the H. 265//HEVC encoder [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016, 11 (4): 663-673.

[6] Zoran M. Miličević, Zoran S. Bojković. Performance of high efficiency video coding (HEVC) HM-16. 6 encoder [C]// Telecommunications Forum Telfor. IEEE, 2016: 712-715.

[7] Abdi L, Abdallah F B, Meddeb A. A robust video watermarking algorithm in H. 264//AVC compressed domain [C]// ACM Symposium on Applied Computing. ACM, 2015: 1291-1293.

[8] 陈青，翁旭峰. 一种新的基于伪 Zernike 矩的图像盲水印算法 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33 (9): 2810-2812. (Chen Qing, Weng Xufeng. Novel blind image watermarking based on pseudo Zernike moments [J]. Application Research of Computers, 2016, 33 (9): 2810-2812.)

[9] Mehmood N, Mushtaq M. A fragile watermarking scheme using prediction modes for H. 264//AVC content authentication [C]// Local Computer Networks Workshops. IEEE, 2013: 1014-1021.

[10] Ling Chen, Urrehman Obaid, Zhang Wenjun. Semi-fragile Watermarking Scheme for H. 264//AVC Video Content Authentication Based on Manifold Feature [J]. Ksii Transactions on Internet & Information Systems, 2014, 8 (12): 4568-4587.

[11] Stütz T, Autrusseau F, Uhl A. Non-Blind Structure-Preserving Substitution Watermarking of H. 264//CAVLC Inter-Frames [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2014, 16 (5): 1337-1349.

[12] 康良成，李朝锋. 基于轮廓波数字水印的 JPEG 图像质量评价方法 [J]. 计算机工程与应用，2016, 52 (21): 206-210. (Kang Liingcheng, Li Chaofeng. JPEG compressed image quality assessment method based on digital watermark-ing in contourlet domain [J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52 (21): 206-210.)

[13] Dalmia N, Okade M. First quantization matrix estimation for double compressed JPEG images utilizing novel DCT histogram selection strategy [C]// the Tenth Indian Conference. 2016: 1-8.

[14] Gaj S, Patel A S, Sur A. Object based watermarking for H. 264//AVC video resistant to rst attacks [J]. Multimedia Tools & Applications, 2016, 75 (6): 3053-3080.

[15] Ma Zhaofeng, Huang Jianqing, Jiang Ming, *et al.* A Video Watermarking DRM Method Based on H. 264 Compressed Domain with Low Bit-Rate Increasement [J]. 电子学报（英文）, 2016, 25 (4): 641-647.

[16] Hale K S, Stanney K M. Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications [M]. CRC Press, Inc. 2014.

[17] Wang Duyao, Huang Sujuan, Feng Guorui, *et al.* Perceptual differential energy watermarking for H. 264//AVC [J]. Multimedia Tools & Applications, 2012, 60 (3): 537-550.

[18] Ansari R, Devanalamath M, Hussain M, *et al.* Robust BPSO and Scene Change Based Digital Video Watermarking Algorithm in DWT-DFT-SVD Domain [M]// Security in Computing and Communications. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 168-178.

[19] Dong Jiangtao, Li Jingping. A Robust Zero-Watermarking Algorithm for Encrypted Medical Images in the DWT-DFT Encrypted Domain [M]// Innovation in Medicine and Healthcare 2016. Springer International Publishing, 2016.

[20] 王刚，李朝锋. 基于视差图和复数轮廓波变换的无参考立体图像质量评价 [J]. 计算机工程与科学，2017, 39 (3): 512-518. (Wang Gang, Li Chaofeng. Blind stereo image quality assessment based on disparity map and complex contourlet transform [J]. Computer Engineering and Science, 2017, 39 (3): 512-518.)